

Title	<高校生のページ>人に寄り添う安全安心なコンピュータの実現を目指して
Author(s)	石原, 亨; 小野寺, 秀俊
Citation	Cue : 京都大学電気関係教室技術情報誌 (2017), 38: 58-62
Issue Date	2017-09
URL	http://hdl.handle.net/2433/227456
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

高校生のページ

人に寄り添う安全安心なコンピュータの実現を目指して

情報学研究科 通信情報システム専攻 集積システム工学講座 大規模集積回路分野
石 原 亨、小野寺 秀 俊

1. コンピュータの消費エネルギーと信頼性

今日の高度情報化社会は図1に示すとおり、多くのコンピュータシステムによって支えられています。最近良く耳にする人工知能（AI）や深層学習（Deep Learning）もコンピュータシステムとその上で動作するソフトウェアプログラムによって実現されています。コンピュータシステムはスマートフォンやパソコンなどの分かりやすい情報通信機器だけでなく、冷蔵庫やエアコンなどの家電製品や自動車あるいはエレベータなどに組み込まれ、我々の生活をそれとなく支えています。これらコンピュータシステムの頭脳役割を果たしているのがSystem-on-Chip（以下 SoC）です。SoC は様々な信号処理機能を1つの半導体チップ上に集積した超多機能集積回路です。SoC は典型的には 10mW ～ 10W 程度の電力を消費します。仮に、日本人が1人当たり1つの SoC を使用しているとする、単純計算では日本だけで最大 130 万 kW にも及ぶ電力を消費することになります。これは、原子炉 2 基～ 5 基分に相当する電力です。

最近では人間だけでなく“モノ”がインターネットにつながって自律的に情報をやりとりする Internet of Things（IoT）の世界が現実のものとなりつつあります。スマートフォンは当然ですが、例えば監視カメラやバス停留所の時刻表、あるいは家庭の洗濯機や地下鉄の改札機がインターネットに繋がる時代もそう遠くはないかもしれません。防犯システムに必要な監視カメラは、カメラ自体のコストよりも電源を設置するためのコストの方が大きくなるが多いため、乾電池や太陽電池などによって、

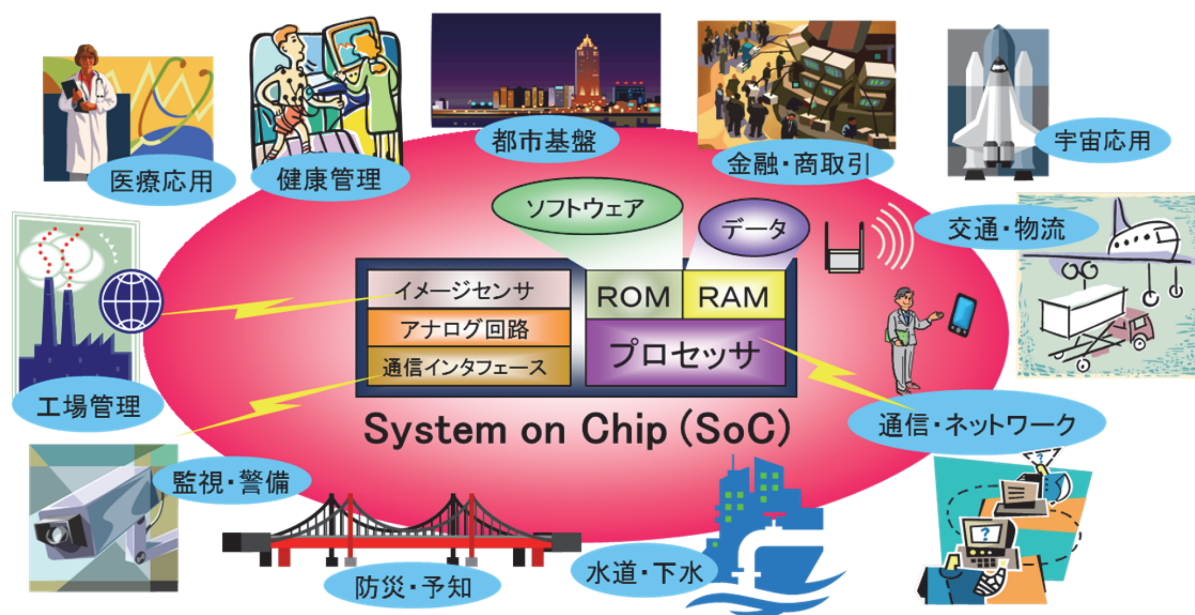


図1 高度情報化社会とコンピュータシステムの役割

電源敷設コストをなくすことができれば監視システム全体のコストを大幅に抑えることができます。また、太陽電池や小型の風力発電機などによって環境から採取する自然エネルギーのみを使用して監視カメラと画像処理用 SoC を稼働させることができれば、電気を作る際の二酸化炭素排出量を極小に抑えることができ、社会全体の低炭素化と高度情報化に貢献することになります。今後も今日の高度情報化社会を発展させるためには、コンピュータシステムを低いエネルギーで稼働させる技術が鍵となります。我々の研究室では、SoC の消費エネルギーを大幅に低減することにより、微小な自然エネルギーのみで自律的に動作するコンピュータシステムの研究に取り組んでいます。

一方で半導体チップの微細化と高集積化に伴い、SoC のハードウェア設計は複雑化し、過去 10 年の間に、ハードウェアの設計コスト、マスクコスト、検証コスト、およびテストコストが急激に上昇しました。製品ごとに専用のハードウェアを作り直す旧来のアプローチでは、半導体ビジネスで収益を得ることが極めて難しい状況です。特にスマートフォンや高精細テレビなどのデジタル情報家電は製品サイクルが短く、仕様変更やバージョンアップなどが頻繁に行われるため、これらの状況に柔軟かつ低コストで対応できるアプローチが求められています。また、トランジスタの微細化に伴い、半導体チップの特性ばらつきが大きな問題となっています。同じ設計図に基づいて製造した半導体チップでも 1GHz の動作周波数で正常に動作するチップもあれば、800MHz の動作周波数でしか動作しないチップもあります。トランジスタの漏れ電流による消費電力も深刻な問題です。同じ設計に基づくチップでもトランジスタの個体差により、チップごとに消費電力が異なります。さらに、トランジスタの特性は時間とともに変化することも知られています。製品化された当初は 1GHz の動作周波数で正常に動作していた半導体チップが 1 年後には 800MHz でしか動作しなくなることも起こり得ます。経年変化だけでなく、数分程度の短い間隔でトランジスタの特性がランダムに変動する現象も見つかっています。上記のようなトランジスタの特性変動や経年劣化は SoC の故障の原因となります。図 1 に示したように、今日の高度な情報化社会はコンピュータシステムに強く依存しており、我々の生活は SoC 抜きに考えることはできません。SoC の故障は安全安心な今日の社会システムの根幹を揺るがす大問題につながります。我々の研究室では、刻々と変動するトランジスタ特性の高精度なモデル化と半導体チップの制御技術により、SoC の故障を回避する技術の研究に取り組んでいます。上述の SoC の省エネルギー技術の研究と併せて、SoC の高集積化と大規模化に伴う諸問題の解決に取り組んでいる点が我々の研究室の特徴です。

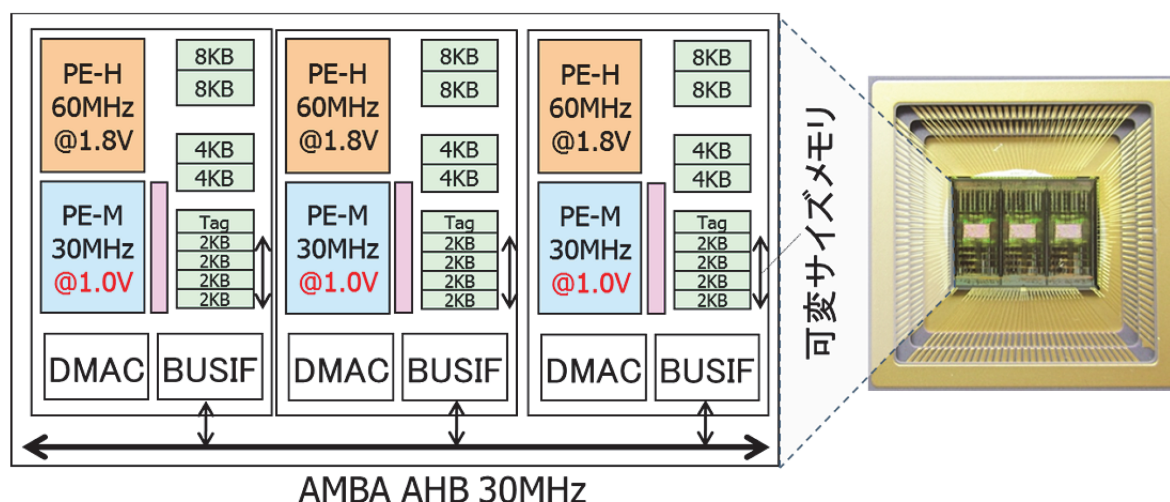


図2 電源電圧とメモリサイズを瞬時に変更可能なマルチコアプロセッサ

2. コンピュータシステムの省エネルギー化

経済産業省は、2025年にICT機器の消費電力が全消費電力の20%を占めるまでに増大すると試算しています。ICTはInformation and Communication Technologyの略で、ICT機器は情報通信の担い手となる電子機器を表します。ICT機器の中でも特に大きな電力を占めるのがマイクロプロセッサとメモリです。マイクロプロセッサとメモリは、SoCの大部分の機能を担う主要部品です。今日のネットワーク機器や携帯型情報端末は非常に高い性能を必要としますが、時間によってはほとんど何も仕事をしていません。つまり、動物と同じで、狩りをする時や敵から逃げる時のような「いざ」という時には高い性能を必要としますが、ほとんどの時間はのんびり過ごしています。しかし、従来の高性能マイクロプロセッサはのんびりしていても大きな電力を消費してしまい、低消費電力指向のマイクロプロセッサは「いざ」という時でも十分な性能が出せません。我々の研究室では、ピーク時の性能が高く平均消費電力の小さいメリハリの効いたマイクロプロセッサを開発しました。具体的には、電源電圧の異なる複数の中央演算装置（CPU）をチップ上に搭載したマルチコアプロセッサを基に、各々のCPUが使用する電源電圧とメモリのサイズを瞬時に変更する機構を開発しました（図2参照）。CPUの電源電圧を下げると消費電力は電圧の2乗に比例して小さくなりますが、性能も電圧にほぼ比例して悪化します（図3参照）。メモリに関しても、使用するサイズを小さくすることで消費電力を抑えることが出来ますが性能は悪化します（図3参照）。

上述したような消費電力と性能のトレードオフ関係を考慮することによって、必要最小限のメモリサイズと電源電圧を適切に選択して使用することが重要です。我々の研究室では、SoCのハードウェアだけでなく、SoCにとって最適な電源電圧とメモリサイズを動作時に選択するソフトウェア技術を開発しました。具体的には、マイクロプロセッサ上で動作するリアルタイムオペレーティングシステム（以下、リアルタイムOS）が、CPUの最適な動作電圧とメモリサイズを計算する方法を開発しました。リアルタイムOSは、マイクロプロセッサ上で動作する複数のアプリケーションプログラムをタスクと呼ばれる実行単位に分割して、個々のタスクに与えられた制限時間内に全てのタスクを実行します。したがって、リアルタイムOSは個々のタスクがいつまでにその処理を終えればよいかを知っています。我々の研究室で開発した方法は、個々のタスクの制限時間とCPUの性能を基に、各タスクの実行に最低限必要な電源電圧とメモリサイズを算出し、それらをCPUに使用させます。マイクロプロセッサの電源電圧をソフトウェアによって制御する技術は1990年代に提案され、現在ではスマートフォンやノート型コンピュータ向けのプロセッサに応用されています。しかし、初期の電源電圧制御技術はリアルタイムシステムを対象としておらず、タスクの実行時間が正確に考慮されていませんでした。リアルタイムシステムとは与えられた処理を制限時間内に完了するように設計されたコンピュータシステムです。つまり、初期の電源電圧制御技術はタスクの実行時間を気にしなくても良いシステムにしか適用できない技術でした。しかし、今日の社会を支えるコンピュータシステムは実世界との対話が重要となるため実時間性（つまり、リアルタイム性）が求められます。例えば、

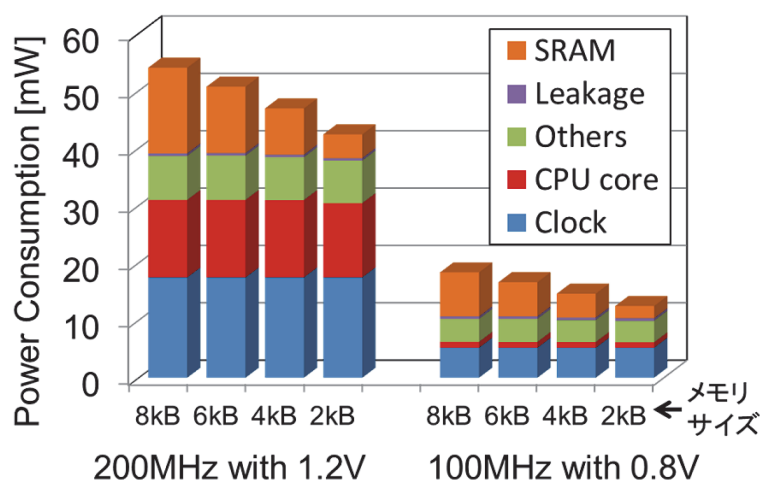


図3 開発したマルチコアプロセッサの消費電力と性能

自動車用の制御機器に組み込まれたCPUの応答性能が悪く、運転者がハンドルを操作してからタイヤが方向を変えるまでに2秒かかったとすると、このCPUは使い物になりません。一般的にCPUの電源電圧を半分に低減するとCPUの動作性能は半分以上に低下し、タスクを制限時間内に処理できなくなる可能性が高くなります。タスクが制限時間内に処理できなければ、電力が低減できてもリアルタイムシステムとしての価値はなくなります。また、初期の電源電圧制御技術は電圧変更に数百マイクロ秒の時間を必要としていたためリアルタイム制御が難しいという問題がありました。我々の研究室で開発したマイクロプロセッサは電源電圧とメモリサイズの変更を $1\mu\text{s}$ 以下で実現します。ドローンなどの自律飛行ロボットや自動車などに組み込まれてリアルタイム制御を行うマイクロプロセッサの省エネルギー化に大きく貢献する技術だと考えています。

3. トランジスタの特性ばらつきと経年劣化への対応

前述のとおり、トランジスタがナノスケールまで微細化すると個々のトランジスタの特性ばらつきの割合が大きくなるのと同時に動的な特性変動や経年劣化の割合も大きくなると考えられています。トランジスタの特性ばらつきや特性変動および経年劣化に対応するための方法として、事前に予備回路をチップに搭載しておきチップ製造後にその予備回路を有効活用する方法とチップに印加するバイアス電圧の設定をチップ製造後に適切に調節する方法を研究しています。トランジスタの特性が設計時の予測より極端に悪くなると、チップに要求される性能を満足できなかったり機能的に正しく動作しなかったりすることがあります。例えば、特性ばらつきの影響で遅延時間が非常に大きいメモリセルや漏れ電流が極端に大きいメモリセルをチップ製造後に検出し、それらのメモリセルが含まれるメモリブロックを無効化して予備メモリブロックに置き換えることにより性能を補償する方法を開発しました。デバイス特性のばらつきをモデル化する研究は数多く行われていますが、チップ設計段階で遅延時間や漏れ電流のばらつきを精度良く見積もることは簡単ではありません。本手法は、チップ製造後にメモリブロックのアクセス遅延時間や漏れ電流を計測し、計測結果に基づいて予備の回路ブロックと置き換えることにより、デバイス特性のばらつきによる負の影響を無視できるほど小さくすることを可能にしました。

最近では、チップの電源電圧とバックゲートバイアス^{*1}をチップ製造後に適切に調節することによりSoCの性能を補償し消費エネルギーを最小値に保つ方法を研究しています。電源電圧を高くすると回路性能と消費電力が共に大きくなります。逆方向に印加するバックゲートバイアスを大きくすると回路性能と漏れ電流は共に小さくなります。したがって、トランジスタの特性ばらつきの具合に応じて適切に電源電圧とバックゲートバイアスを調節することにより、SoCに要求される性能を満足したうえで消費エネルギーを極小化することができます。トランジスタの性能や漏れ電流の量は特性ばらつきや経年劣化だけでなく、温度によっても大きく変化します。そこで、我々の研究室では、SoCの動作中にチップの温度を計測し、温度変化に応じて電源電圧とバックゲートバイアスを動的に調節することにより、SoCに要求される性能を満たしたうえで常に消費エネルギーを最小に保つ手法を研究しています。これらの研究の結果として、信頼性が高く消費エネルギーの小さいコンピュータシステムを実現することを目指しています。

4. 今後の展望

SoCの高性能化に伴う消費エネルギーの増大や半導体デバイスの微細化に伴うデバイス特性のばらつきをチップ製造後の制御によって軽減する技術の研究に取り組んでいます。SoCはハードウェアだけでなく、ハードウェアを制御するソフトウェア技術を含めたシステムとして考えることが重要です。チップ製造後の制御技術によってSoCの性能を補償し消費エネルギーを極小化することができれば、チップの開発コストを大幅に低減することができます。今後ますますチップ開発コストの高騰が心配され

るナノスケール時代に必要不可欠であり、今後の科学・産業技術分野への大きな貢献が期待できる研究と考えています。

※1 バックゲートバイアス

トランジスタのバックゲートに印加するバイアス電圧で、逆方向に掛けるとトランジスタのチャネル部に電流が流れにくくなり、リーク電流は減少するが、トランジスタの遅延は増大する。